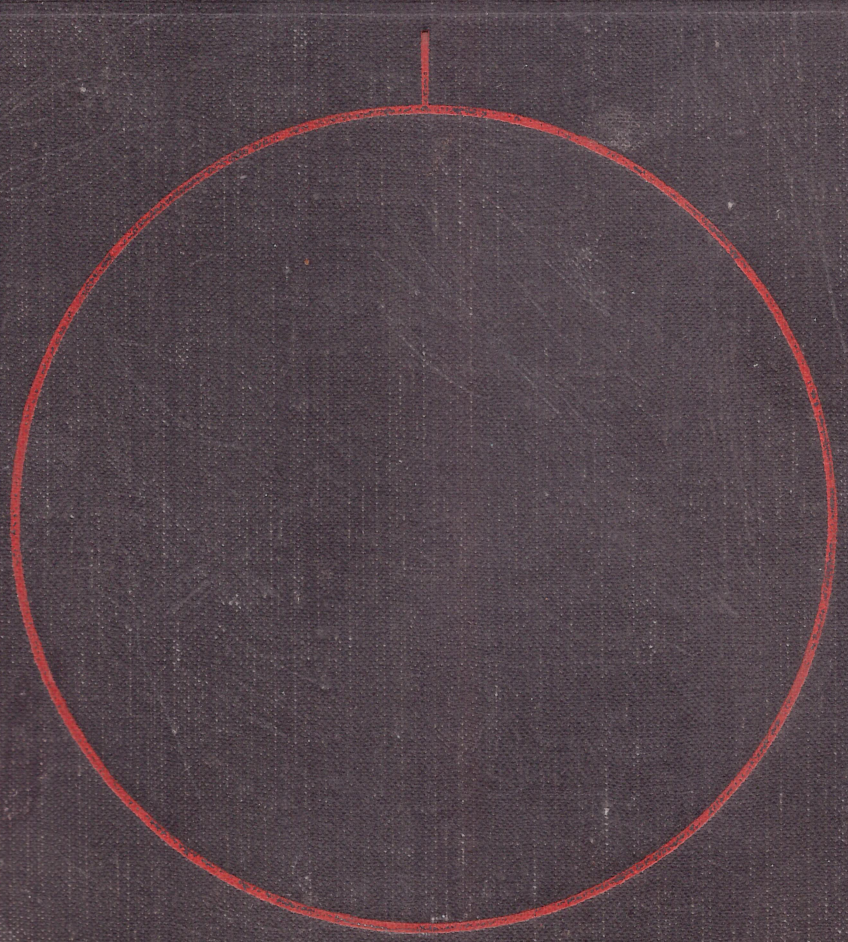
М. П. КОСТЕНКО, Л. М. ПИОТРОВСКИЙ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



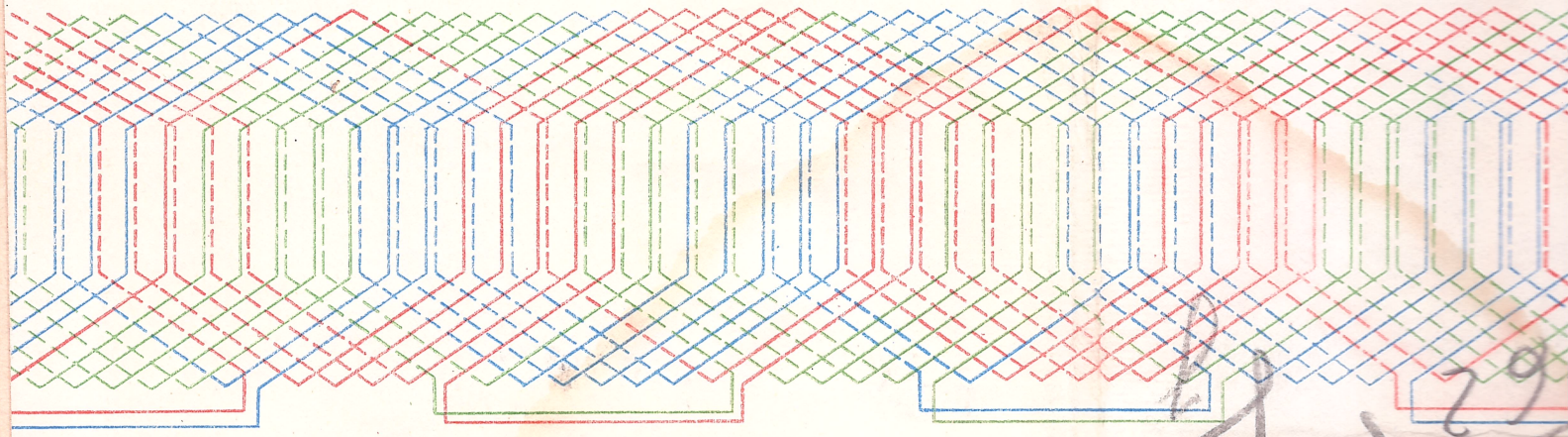
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ 2

19
8
152
144
70
1008

2000

25000
1300
12

9750
1,5
48750
9750
146250 | 2
7



М. П. КОСТЕНКО

# ЭЛЕКТР
# МАШ

ЧАС

**МАШИНЫ ПЕ**

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕ

*Допущено Министерством высшего*
*в качестве у*
*электроэнергетических и элек*
*технически*

Индус
МАШ

„Э
Ленингра

М. П. КОСТЕНКО, Л. М. ПИОТРОВСКИЙ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

## МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей высших технических учебных заведений*

№ 87080
БИБЛИОТЕКА
ММП УРСР

„ЭНЕРГИЯ"
Ленинградское отделение
1973

6П2.12
К72
УДК 621.313/314(075,6)

Рецензент—кафедра электрических машин МЭИ (зав. кафедрой чл.-корр. АН СССР *Г. Н. Петров*)

**Костенко М. П., Пиотровский Л. М.**

К72 Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. — Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л., «Энергия», 1973.

648 с. с ил.

В книге излагаются основы теории электрических машин переменного тока, рассматриваются принципы их устройства и производится анализ их работы.

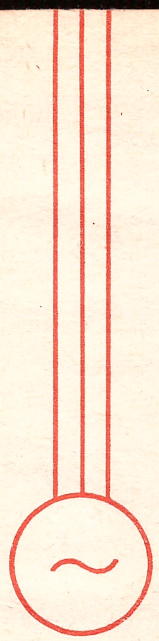
Рассматриваются синхронные, асинхронные и коллекторные машины переменного тока.

Книга представляет собой общий курс электрических машин и предназначена для студентов энергетических и электротехнических вузов. Она может быть также полезна инженерам-электрикам, работающим в области теории, исследования, производства и эксплуатации электрических машин.

В третьем издании сделаны некоторые дополнения и уточнения отдельных разделов книги.

К 3310-029
051(01)-73 30-БЗ-28-72 6П2.12

© Издательство «Энергия», 1973 г.



ОБЩИЕ ВОПР
МАШИН ПЕРЕ

ских машин МЭИ (зав. кафедрой

й Л. М.
В 2-х ч. Ч. 2. — Машины пе-
студентов высш. техн. учеб.
Л., «Энергия», 1973.

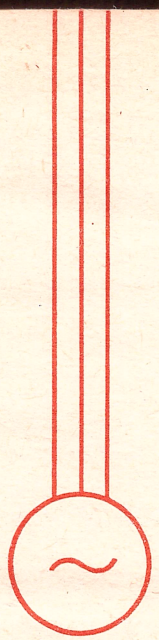
ии электрических машин переменного
стройства и производится анализ их

хронные и коллекторные машины пе-

урс электрических машин и предназна-
электротехнических вузов. Она может
никам, работающим в области теории,
ции электрических машин.
ые дополнения и уточнения отдельных

6П2.12

73 г.



Раздел первый

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ческой прочности ротора и луч-
мотки возбуждения последнюю
хности ротора, т. е. выполнять
и же $p \geqslant 3$, то скорость на ок-
синхронные машины выполня-
как при этом их изготовление

всего приводятся во вращение
бинами. В первом случае синх-
турбогенератором, а во
Паровые турбины принадле-
соответственно чему турбогене-
полнение. Наоборот, гидрогене-
нение, так как гидравлические
коходных машин. В явнополюс-
акже синхронные генераторы,
телями внутреннего сгорания,
омпенсаторы. Но в тех случаях,
тели с большой скоростью вра-
бокомпрессоров), они выполня-
к двухполюсные машины неяв-

## осных синхронных машин

машин на примере турбогенера-
ераторы изготовляются преиму-
нении, так как при увеличении
работы паровых турбин зна-
некоторого уменьшения габари-
ляется их изготовление.
ный разрез двухполюсного тур-
» на 6 тыс. *квт*, 3000 *об/мин*,
и для машин большей мощно-
ическом и тепловом отношении
ет ротор. При нормальной ско-
и на окружности ротора дости-
богенераторах 125—145 *м/сек*,
ах большой мощности — 170—
х скоростях центробежные силы
ора весьма большие механиче-
современных турбогенераторах
сивным (рис. 1-3) из цельной
сти, достигаемой в результате
механической обработки ее.
пециальная хромоникельмолиб-
противлением разрыву около
—600 *н/мм*² и удлинением около
сей длине ротора просверлива-

ется центральное отверстие, служащее, во-первых, для исследования материала в центральной зоне поковки, а во-вторых, разгружающее поковку от опасных внутренних напряжений.

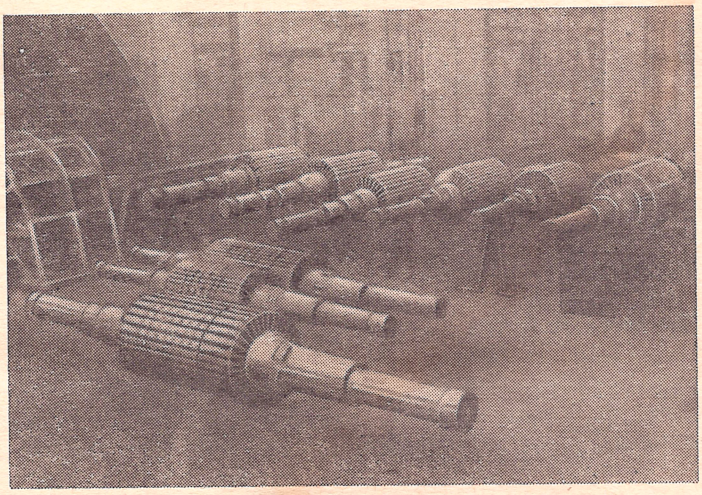


Рис. 1-3. Конструкция ротора турбогенератора

В роторе фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения. Различают: а) роторы с радиальными пазами и б) роторы с параллельными пазами (рис. 1-4, *а*, *б*). Мы будем иметь в виду конструкцию с радиальными пазами.

Примерно третья часть полюсного деления оставляется свободной от пазов и образует так называемый большой зубец, через который проходит главная часть магнитного потока генератора.

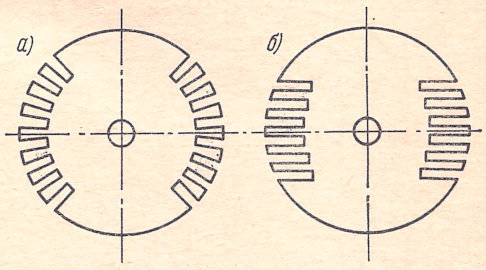



Рис. 1-4. Пазы ротора турбогенератора

В связи с большими скоростями на окружности ротора закрепление обмотки ротора в пазах производится при помощи металлических клиньев, основные формы сечения которых показаны на рис. 1-5, *а* и *б*. Клинья делаются из немагнитной стали и из немагнитных сплавов.

Закрепление лобовых частей обмотки ротора производится при помощи роторных бандажей. Бандаж состоит из двух частей: бандажного кольца *Б* (рис. 1-6) и центрирующего кольца *ЦК*. Бандажные кольца выполняются обычно из немагнитной стали с временным сопротивлением 700—1000 *н/мм*² и пределом теку-

для установки на открытом воздухе, изготовленный фирмой «Альстом» (Франция).

Для иллюстрации в табл. 1-2 приводятся основные данные ряда гидрогенераторов с различными скоростями вращения, выполненных в СССР и за рубежом.

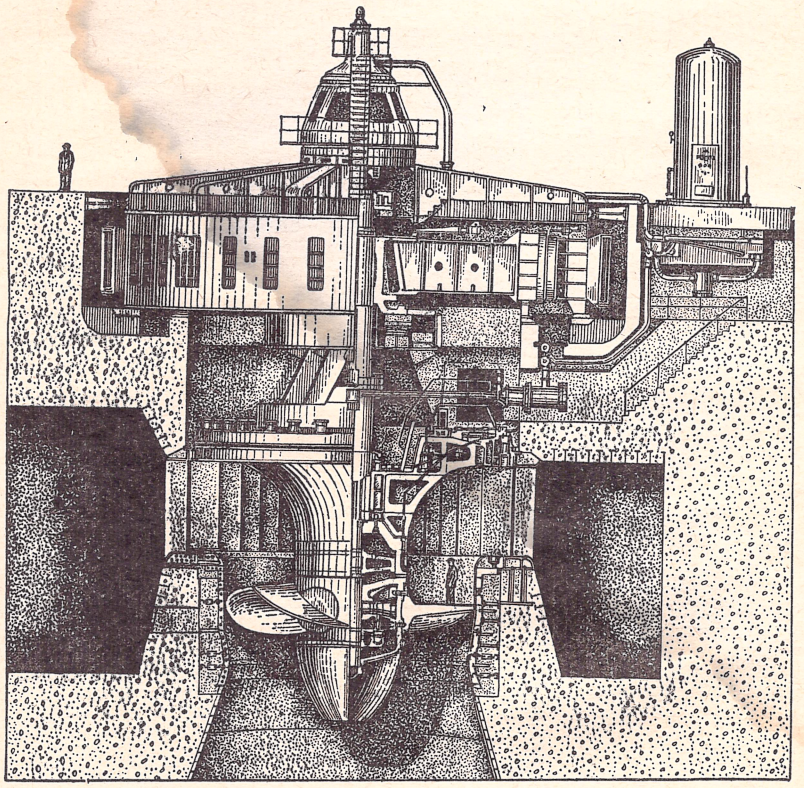


Рис. 1-9. Гидроагрегат Волжской гидроэлектростанции им. В. И. Ленина

Явнополюсные генераторы часто выполняются с успокоительной обмоткой на роторе, назначением которой является успокоение колебаний ротора при переходных процессах (гл. 16) и облегчение несимметричных режимов работы (гл. 14). Успокоительная обмотка состоит из медных стержней, заложенных в пазы на полюсных наконечниках и соединенных между собой по торцам короткозамыкающими сегментами. Сегменты отдельных полюсов в современных генераторах обычно соединяются в общие кольца (рис. 1-10), в результате чего получается короткозамкнутая обмотка того же типа, что и в асинхронных машинах с короткозамкнутым ротором (§ 1-7).



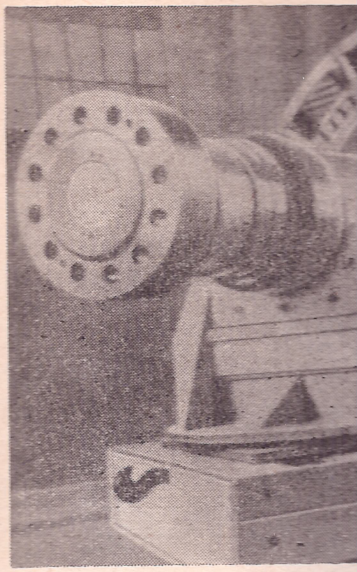
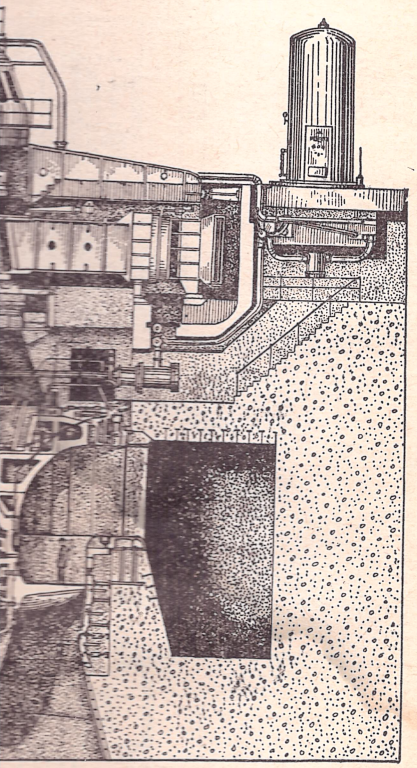


Рис. 1-10. Ротор горизонтальног
428 *об/мин* для гидр

Рис. 1-11. Гидроагрег

духе, изготовленный фирмой «Альс-

1-2 приводятся основные данные
ичными скоростями вращения, вы-
м.



дроэлектростанции им. В. И. Ленина

асто выполняются с успокоитель-
нением которой является успокое-
одных процессах (гл. 16) и облег-
работы (гл. 14). Успокоительная
жней, заложенных в пазы на по-
нненных между собой по торцам
ии. Сегменты отдельных полюсов
чно соединяются в общие кольца
получается короткозамкнутая об-
хронных машинах с короткозамк-



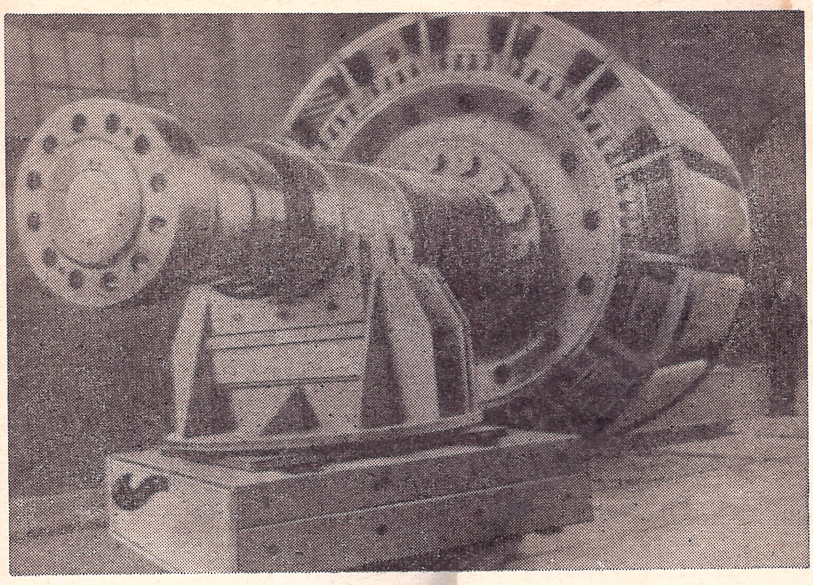


Рис. 1-10. Ротор горизонтального гидрогенератора мощностью 80000 *кв · а*, 428 *об/мин* для гидростанции Мальговер (Франция)

Рис. 1-11. Гидроагрегат станции Мальговер (Франция)

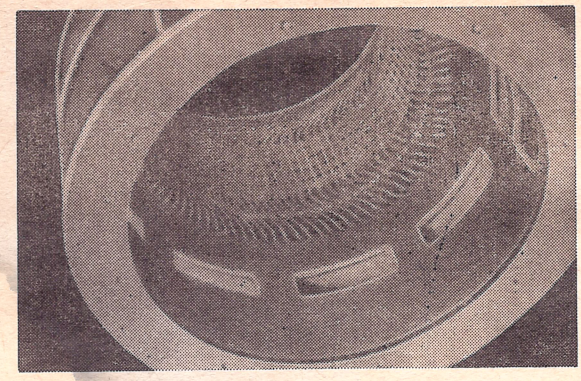


Рис. 1-12. Статор вертикального гидрогенератора мощностью 250 *кв·а*, 600 *об/мин*

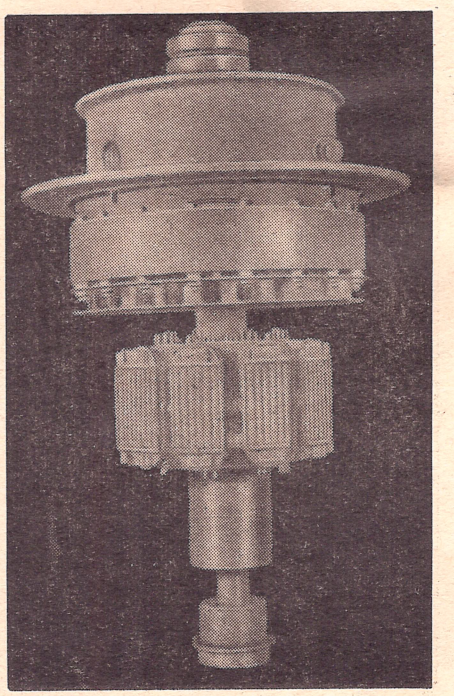


Рис. 1-13. Ротор и верхняя крестовина гидрогенератора мощностью 250 *кв·а*, 600 *об/мин*



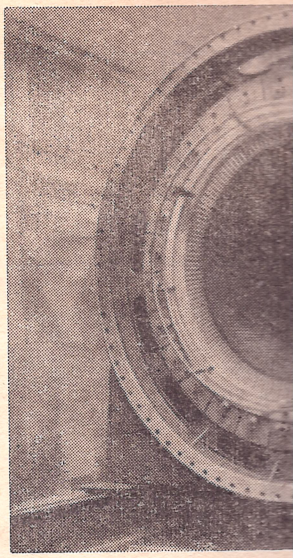


Рис. 1-14. Статор необмо
мощностью 60000 *кв·а*,

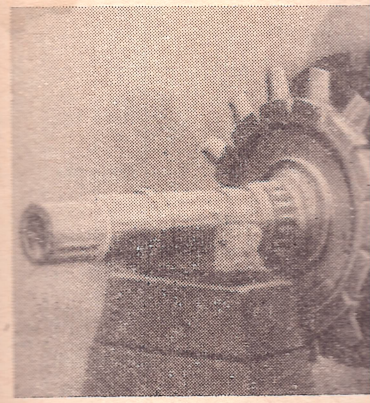
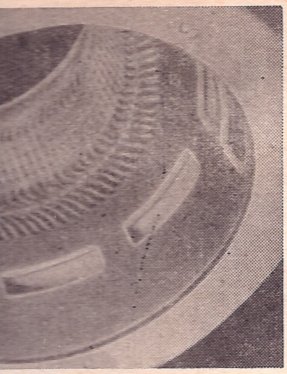
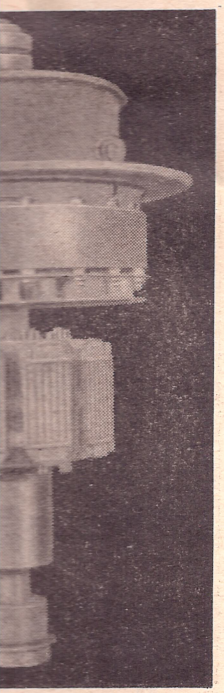


Рис. 1-15. Ротор синхронного
1000 *об/мин*



ого гидрогенератора мощностью
600 *об/мин*



естовина гидрогенератора мощ-
·*а*, 600 *об/мин*



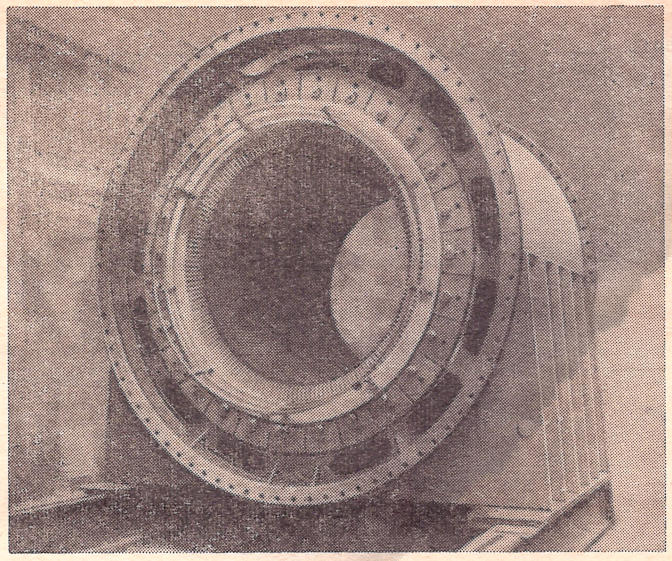


Рис. 1-14. Статор необмотанный синхронного компенсатора мощностью 60000 *кв · а*, 1000 *об/мин* фирмы «Альстом» (Франция)

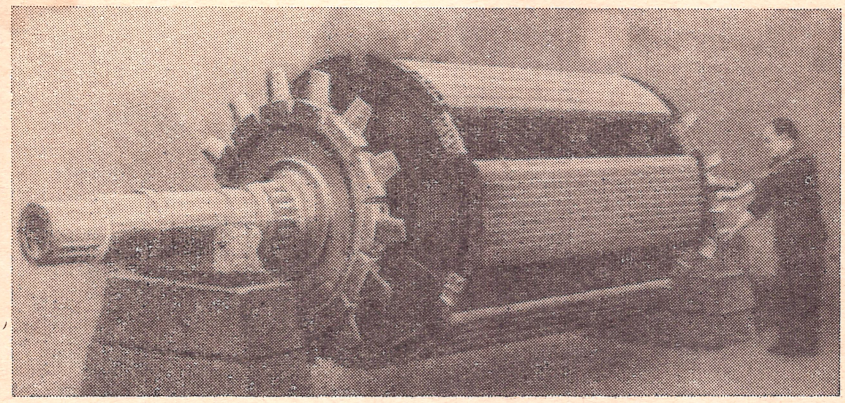


Рис. 1-15. Ротор синхронного компенсатора мощностью 60000 *кв · а*, 1000 *об/мин* фирмы «Альстом»

Явнополюсные синхронные двигатели и компенсаторы имеют в общем такую же конструкцию, как и явнополюсные генераторы. На их роторе (рис. 1-15), кроме обмотки возбуждения, устанав-

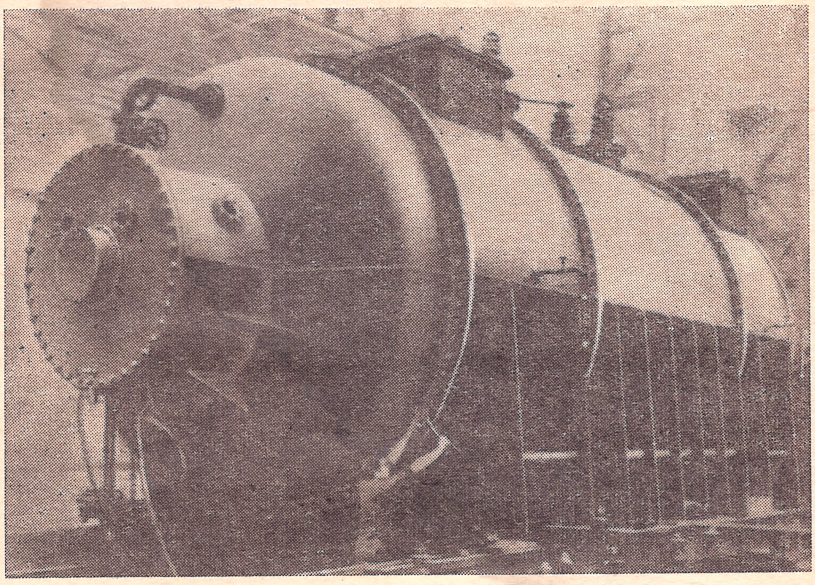


Рис. 1-16. Внешний вид синхронного компенсатора мощностью 60000 *ква*, 1000 *об/мин* фирмы «Альстом»

ливается также пусковая обмотка, отличающаяся от успокоительных обмоток генераторов только тем, что стержни выполняются из сплавов с повышенным удельным сопротивлением.

### 1-7. Высокочастотные и специальные синхронные машины

Однофазные машины с частотой от 500 до 15 000 *гц* и мощностью до нескольких сотен киловатт в настоящее время применяются для питания индукционных печей для плавки металлов, для индукционной закалки стали и для нагрева металла при ковке и штамповке. В подобных машинах индуктирование э. д. с. высокой частоты достигается за счет пульсации магнитного потока, вызываемого относительным перемещением зубцов статора и ротора. Обмотка переменного тока и обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, размещаются на статоре, а ротор не имеет какой-либо обмотки. Во избежание индуктирования э. д. с. высокой частоты в обмотке возбуждения, принимаются меры к тому, чтобы сцепленный с этой обмоткой магнитный поток оставался при вращении ротора неизменным. Для изготовления участков магнитной цепи с пульсирующим магнитным полем применяется тонкая (0,2—0,3 *мм*) листовая электротехническая сталь.



На рис. 1-17 изображен
торного типа с кольцевой обм
между двумя пакетами статор
На каждом из пакетов статор
ного тока, которые состоят из
зубцу статора. Ротор машины
ванными вдоль оси пазами. Чи
Направление магнитных лини
рис. 1-17 стрелками. При пе

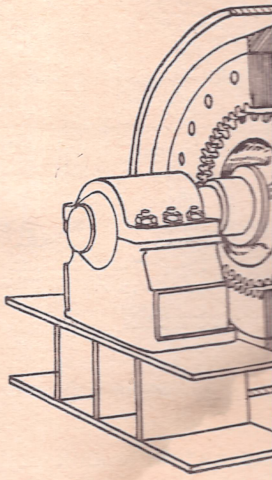


Рис. 1-17. Высокочаст
типа (без рабоч

тельно статора поток в зубца
тотой $f=Zn$, и в катушках с
же частоты. Зубцы одного па
зубцов другого пакета на пол
этому величина общего пото
буждения э. д. с. не индуктиру

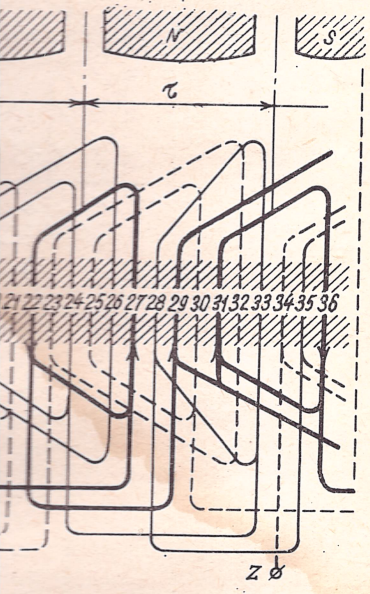
В последнее время снова
шины с когтеобразными пол
дения на статоре, обтекаему
машин разработаны Академи

### 1-8. Основные конструк
### бесколле

Здесь мы будем иметь в
коллекторную асинхронную
значение (слово „бесколлекто

днослойная петлевая обмотка
$\frac{9}{12}\tau$, при $2p=4$, $Z=48$ и $q=4$.
иваемой обмотки, имеющая по
сном делении, изображена на

обмотки можно осуществлять
елений. Такая схема имеет при-




мотки с $Z=36$, $2p=4$, $q=3$, $y=7$

х обмоток, причем стержни и
ьно и спаиваются при укладке

обмотки размещают в двух
машины, а именно: провод-
с. 3-4, *а*, наклоненные на схеме
ной плоскости, а наклоненные
дники лобовой части при этом
происходит название обмотки.
распространение в старой се-
тросила», а также в ряде син-
нения.
распределения обмотки рас-
меть в виду, что катушечные

группы этой обмотки имеют по $q/2$ катушек и поэтому в формулах (2-15) и (2-17) вместе $q$ надо подставлять $q/2$.

**Б. Цепная обмотка.** В асинхронных машинах малой мощности, где находят известное применение однослойные обмотки со схемой, аналогичной рис. 3-4, лобовым частям придают иную форму, поскольку в этом случае катушки являются многовитковыми и при укладке легко деформируемыми («мягкими»). Схема такой обмотки при $m=3$, $Z=36$, $2p=4$, $q=3$, $y=\frac{7}{9}\tau$ изображена на рис. 3-5. Схема рис. 3-5 отличается от схемы рис. 3-4 только формой лобовых частей.

Обмотка на рис. 3-5 по виду своих лобовых частей носит название цепной. На рис. 3-6 представлен статор асинхронного двигателя в процессе укладки в его пазы цепной обмотки.

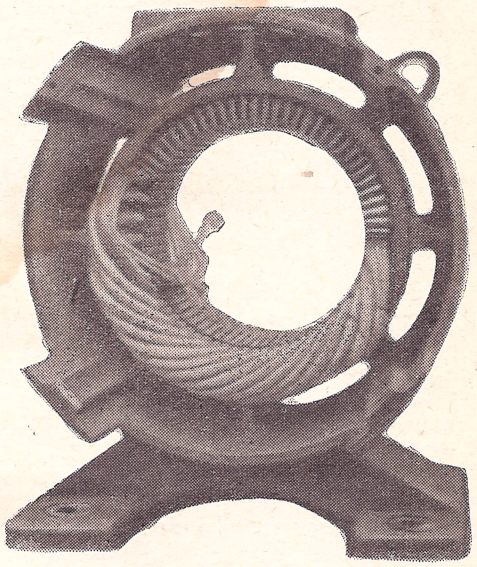


Рис. 3-6. Статор асинхронного двигателя с частично уложенной цепной обмоткой

**В. Однослойные обмотки «вразвалку».** Однослойные обмотки рассмотренных типов могут при четном $q$ также изготовляться с отгибом лобовых частей $q/2$ катушек в одну сторону и соседних с ними $q/2$ катушек — в другую сторону и т. д., или, как говорят, «вразвалку». Хотя шаги катушек обмоток «вразвалку» в таком случае получаются пространственно менее полюсного деления, однако эти обмотки по существу имеют электрические свойства обмоток с полным шагом, так как зоны разных фаз не перекрещиваются и все проводники данной фазы можно пересоединить в витки и катушки с полным шагом. Поэтому при вычислении обмоточных коэффициентов шаги обмоток нужно считать полными, а за $q$ принимать действительное число пазов на полюс и фазу. Схема обмотки «вразвалку» для $m=3$, $2p=4$, $Z=48$ и $q=4$ дана на рис. 3-7.

Лобовые части рассматриваемых обмоток размещаются так же, как и обмоток по схеме рис. 3-5. Так как шаг катушек является пространственно укороченным, то лобовые части имеют меньшую длину, чем при катушках с полным шагом, что и представляет преимущество обмоток «вразвалку» по сравнению с обмотками, где катушки имеют пространственно полный шаг.

В рассмотренных однослойных обмотках можно образовать $p$, а частично и $2p$ равноценных параллельных ветвей.

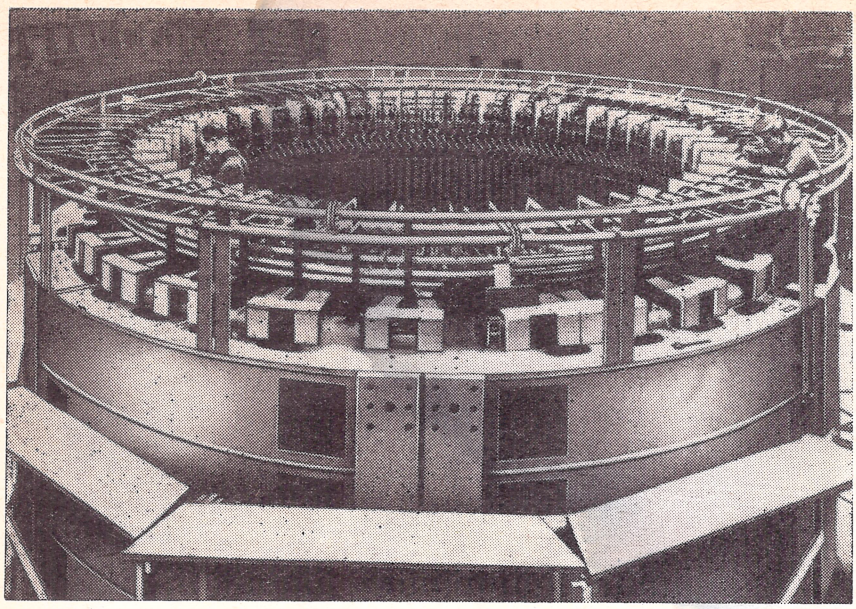


Рис. 7-12. Статор гидрогенератора 190 *Мв · а*, 375 *об/мин* с полным водяным охлаждением

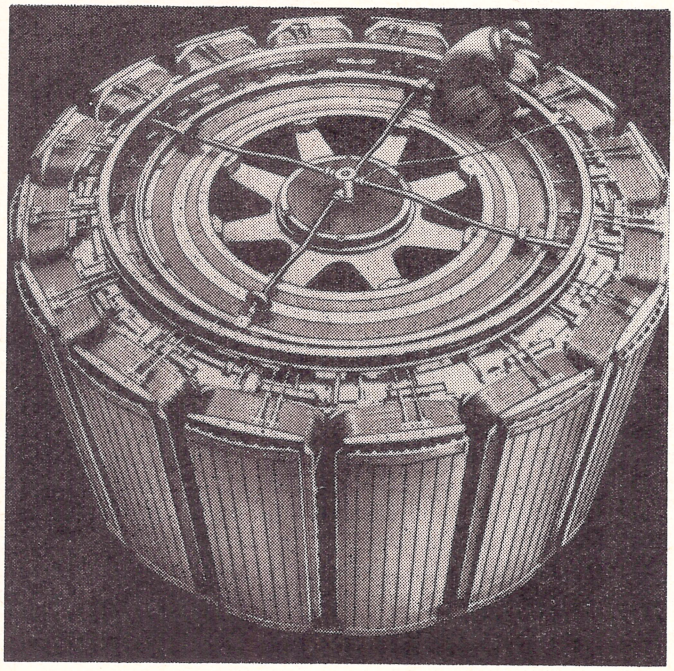
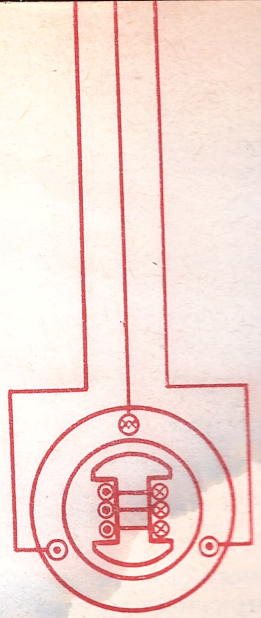
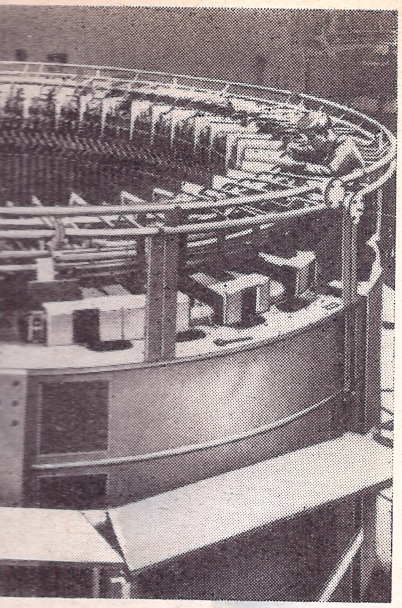


Рис. 7-13. Ротор гидрогенератора 190 *Мв · а*, 375 *об/мин* с полным водяным охлаждением

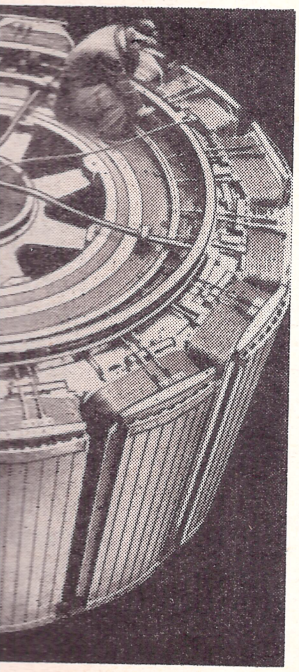




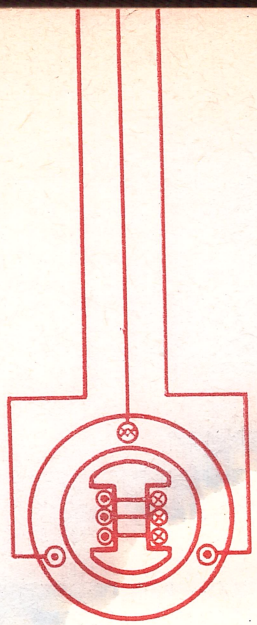
СИНХРОНН



*в · а, 375 об/мин* с полным водяным
нем



*90 Мв · а, 375 об/мин* с пол-
аждением



Раздел второй

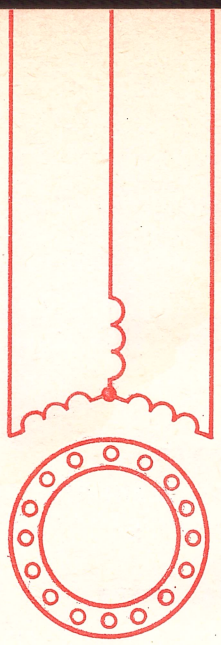
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ыпадению из синхронизма, но
х выключателей отключение
ьше, чем угол отставания век-
уждения э. д. с. от вектора
сле отключения короткого за-
ительной обмотки быстро воз-
ащения.

**ого преобразователя**

ыполнялись при частоте $f=$
широкое применение для пре-
тоянный, особенно в электри-
ни вытеснены в этой области
тным выпрямителем. Однако
корный преобразователь эко-
тому в специальных установ-
щее время. При малых мощ-
ь нередко выполняется без
ными обмотками постоянного
можно было устанавливать
иями постоянного и перемен-

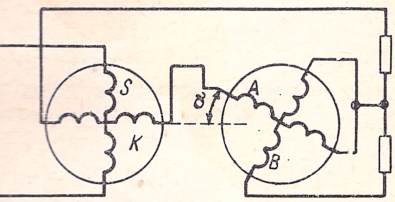
отками применяются также
ка — постоянного и перемен-
о вращение первичными дви-
всего двигателями внутрен-
ивном исполнении изготовля-
малой мощности, в которых
спользуется для питания об-
и отпадает надобность в от-



Раздел третий

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

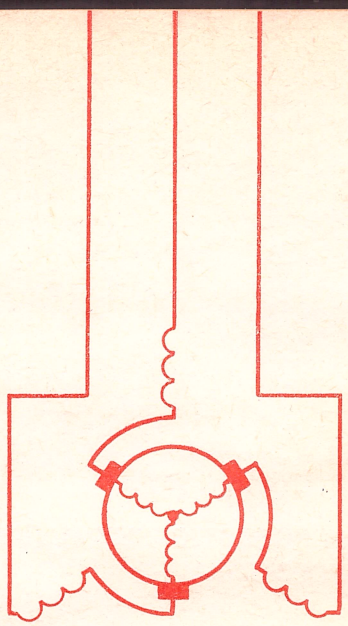
ются поворотные трансформа-
конструкции нормальным асин-
ками ($S$, $K$) на статоре и по-
вумя обмотками ($A$, $B$) на ро-
трансформаторах принимают
тобы распределение магнитной
ь воздушного зазора было по
лиже к синусоидальному. Если
виях питать одну из обмоток
мер обмотку $S$ на рис. 26-7,
ком, то в обмотках ротора $A$
уктироваться э. д. с., пропор-
ответственно $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$. Та-
атор называется синус-косинус-
жения обмоток $A$ и $B$ будут
иональны $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$, если
их внешние нагрузки одина-
ют искажения, вызванные по-
енным перпендикулярно оси об-
ести к минимуму, замыкая об-




ис. 26-9. Схема соединения обмо-
к линейного поворотного транс-
форматора

отивление. Такое мероприятие

е рис. 26-9 и питать перемен-
е на зажимах последовательно
0÷65° будет изменяться прак-
бмотка $B$ в целях симметриро-
шнее сопротивление. Такой по-
я линейным.



Раздел четвертый

# КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Глава тридцатая. **Каскадные соединения асинхронных и коллекторных машин**

30-1. Предварительные замечания . . . . . 615
30-2. Механический каскад асинхронного двигателя с одноякорным преобразователем и с двигателем постоянного тока в качестве регулирующей машины (каскад Кремера) . . . . . —
30-3. Каскад с электрическим соединением (каскад Шербиуса) . . . . . 618
30-4. Характеристики каскадов с механическим и электрическим соединениями 619

Глава тридцать первая. **Многофазные коллекторные генераторы**

31-1. Принцип действия и основные соотношения . . . . . 621
31-2. Компенсированный коллекторный генератор явнополюсного типа с обмоткой возбуждения на статоре (генератор Шербиуса) . . . . . 622
31-3. Компенсированный коллекторный генератор неявнополюсного типа . . —
31-4. Применение коллекторного генератора . . . . . 625
31-5. Тиристорные кремниевые управляемые вентили . . . . . —
Список литературы . . . . . 626
Предметный указатель . . . . . 638

*Михаил Полиевктович Костенко*

*Людвиг Марианович Пиотровский*

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Ч. 2.**

Научный редактор *П. В. Анемподистов*
Редактор *Л. М. Пархоменко*
Художественный редактор *Г. А. Гудков*
Технический редактор *О. С. Житникова*
Корректоры *М. Э. Орешенкова, С. В. Иовенко*

Сдано в набор 11/XII 1972 г. Подписано к печати 21/V 1973 г. М-17943. Формат 60×90 1/16. Бумага типографская № 2. Печ. л. 40,5. Уч.-изд. л. 44. Тираж 60 000 (первый завод 1—30 000). Заказ № 2500. Цена 1 р. 77 к.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», 192041, Ленинград, Марсово поле, 1

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 196126, гор. Ленинград, Социалистическая, 14.

**единения асинхронных и коллектор-**

. . . . . 615
о двигателя с одноякорным преоб-
оянного тока в качестве регулирую-
. . . . . —
ем (каскад Шербиуса) . . . . . 618
еским и электрическим соединениями 619

**офазные коллекторные генераторы**

тношения . . . . . 621
генератор явнополюсного типа с об-
генератор Шербиуса) . . . . . 622
енератор неявнополюсного типа . . —
ора . . . . . 625
мые вентили . . . . . —
. . . . . 626
. . . . . 638



*вич Костенко*
*Пиотровский*

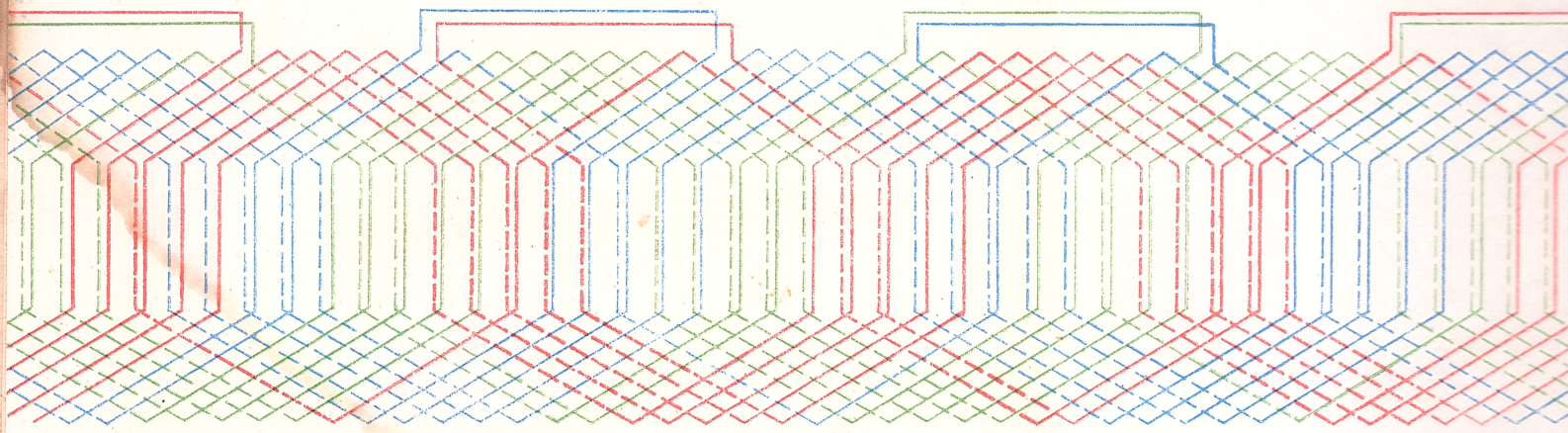
**АШИНЫ. Ч. 2.**

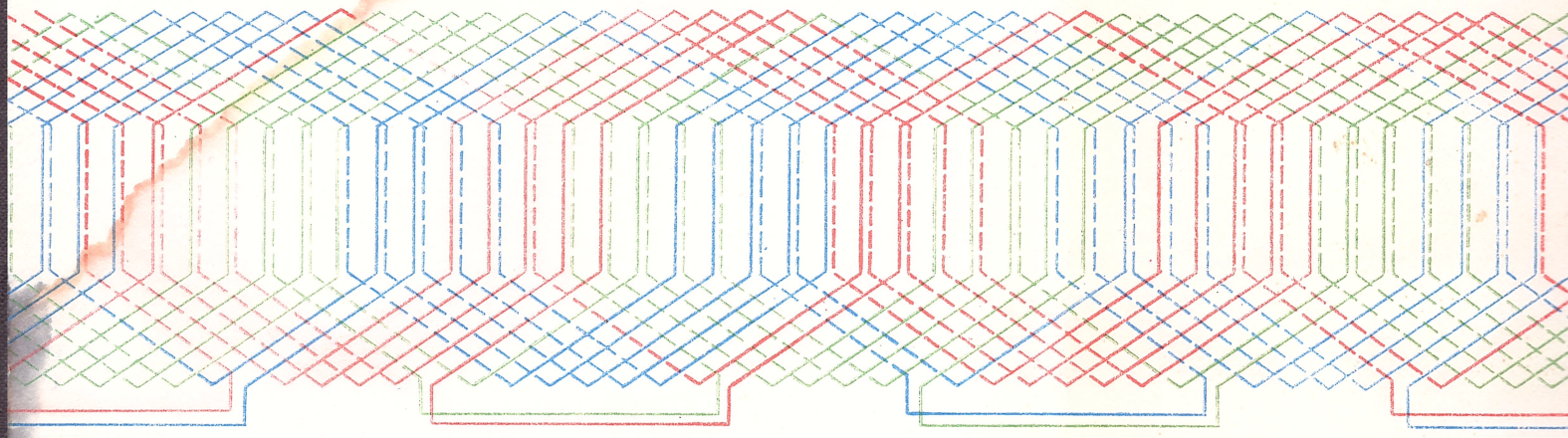
*В. Анемподистов*
*Пархоменко*
*тор Г. А. Гудков*
*О. С. Житникова*
*кова, С. В. Иовенко*

1/V 1973 г. М-17943. Формат 60×90$^{1}/_{16}$. Бумага
Тираж 60 000 (первый завод 1—30 000). За-

*ия»*. 192041, Ленинград, Марсово поле, 1

*ма при Государственном комитете Совета*
*фии и книжной торговли, 196126, гор. Ле-*
*ическая, 14.*





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

2